

흡인식 자기 부상 시스템을 위한 전자석의 모델링 및 해석

이상현[#], 백윤수^{*}

Modeling and Analysis of Electromagnets for Magnetic Suspension System

Sang Heon Lee[#] and Yoon Su Baek^{*}

ABSTRACT

In the precision motion device, the frictional problem by mechanical friction causes serious effects on the system performance. Various researches have been executed to solve this problem, but classical fluid lubrication method has some disadvantages in precision motion under clean environment. Therefore, the magnetic bearing and contact-free systems have been focused on with its pollution-free characteristics. In this paper, we treat modeling and analysis of electromagnets not only for magnetic bearing but also for contact-free electromagnetic actuators. Three types of electromagnet for various applications are modeled and analyzed by magnetic circuit theory and the validity is verified by experiments.

Key Words : Magnetic bearing (자기 배어링), Magnetic suspension (흡인식 자기부상), Magnetic circuit (자기회로), Reluctance (자기저항)

기호설명

- B** = magnetic field density
H = magnetic field intensity
L = inductance
 λ = magnetic flux linkage
p = position vector
 μ_0, μ_r = permeability of air, relative permeability
subscript m, g = magnetic material, air gap

1. 서론

전자부품의 고집적화와 기계부품의 초소형

화등으로 인하여 초정밀 가공기술에 대한 기대 요구치가 증가되고 있다. 반도체 제조공정에서는 현재 마이크로 벡으로 인식되어온 $0.10\mu\text{m}$ 을 뛰어넘어 90나노 기술의 상용화에 접하고 있다. 이러한 시점에서 고전적인 가공기술보다는 광학적 기술작업 등에 의존율이 높다. 하지만 광 응용기를 구동하기 위한 스테이지 기술에 의해 정밀도가 한정되기 때문에 다양한 초정밀 구동기술이 연구되어 오고 있다. 구동 기술로서는 현재 직접구동방식에 의한 비접촉방식에 관한 연구가 정밀도면이나 구동기 제작측면에서 많은 장점을 보이기 때문에 이에 대한 활발한 연구가 진행중이다.^{1,2,3} 또한, 전자기력에 의한 비접촉 시스템은 기계적 접촉으로 인

☞ 2002년 10월 11일 접수
교신저자, 연세대학교 기계공학과
Email shlee34@hotmail.com Tel. (02)2123-4407
* 연세대학교 기계공학부

한 마모 및 마찰의 문제가 발생하지 않기 때문에 자기부상열차와 자기베어링등에 꾸준히 적용이 되어 오고 있으며, 환경문제의 측면에서 많은 장점을 지니고 있다. Jayawant에 의하면 자기부상을 이루기 위한 방법은 9 가지로 분류되는데,⁴ 본 논문에서는 이중 자기 흡인력에 의한 부상(Magnetic suspension)시스템에 중점을 두어 전자석의 모델링 및 해석에 대해서 다루고자 한다. 자기 서스펜션 기술에 관한 연구는 아래와 같이 요약할 수 있다.

- 단일 및 다 자유도 서스펜션 시스템
- 운송수단으로의 응용
- 풍동(wind tunnel)에서의 서스펜션
- 자기베어링으로의 응용(리니어슬라이드, 방진)
- 전기역학(electrodynamic) 서스펜션

본 논문에서는 초정밀 위치결정과 관련 깊은 다자유도 서스펜션 시스템과 자기베어링 및 운송수단에 응용분야를 목표로 두고 여러 형태의 전자석을 제시하고, 각 형태와 극의 형상에 따른 모델링과 해석을 통해 각 모델과 형상에 따른 특성을 파악하여 시스템 구축을 위한 방법론을 제시한다. 본 연구의 결과는 제어기 설계의 바탕이 되기도 한다. 논문의 2 장에서는 구동 목적에 따른 다양한 전자석의 형태에 대해서 설명을 하고, 3 장에서는 제시된 각 모델과 극의 형상에 대해 전자기력을 해석하고, 4 장에서는 실제 전자석의 모델링에 있어서의 문제를 다루며, 최종적으로 실험을 통하여 본 연구의 실효성을 검증한다.

2. 전자석 선정

자기력을 발생시키는 주요한 원리는 일정한 자기장을 통과하는 전류에는 자기력이 작용한다는 로렌츠의 원리와 자속이 흐르는 두 자성체사이에는 자속이 자기에너지의 감소가 일어나는 방향으

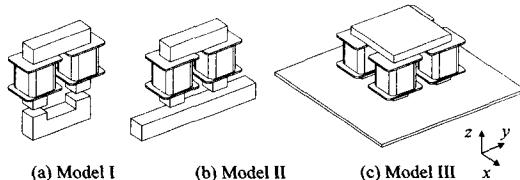


Fig. 1 Various types of electromagnet

로 향하는 특성으로 서로 끌어당기는 자기력이 발생한다는 가변 자기저항(Variable reluctance, VR) 원리가 있다.⁵ 로렌츠 원리에 의한 자기력은 자기장의 크기와 도선을 따라 흐르는 전류의 크기에 비례한다. 이 때, 자기장은 주로 영구자석에 의해서 형성이 되는데, 높은 자화력을 가지는 네오듐계열(NdFeB)의 영구자석이 적용되고 있다. 그러나 큰 자기력이 요구되는 경우에는 높은 전류가 필요하기 때문에 이로 인한 열 발생 문제는 또 다른 문제를 발생의 소지가 있다. 반면에 VR 원리에 의한 자기력은 자성체의 비투자율이 상당히 높은 편이므로 낮은 전류치에 대해서도 높은 자기력을 얻을 수 있어 열 발생문제로부터 자유롭다. 하지만, 로렌츠 원리에 의한 힘은 흡인력과 반발력을 발생시킬 수 있지만 VR 원리로는 반발력을 발생시킬 수가 없기 때문에 두 원리 중 어느 하나가 절대적으로 유리하다고는 말할 수 없다. 그러므로, 적용될 시스템의 특성과 용도에 따라서 적절히 선택하여야 한다. 본 연구에서는 자기베어링과 초진공 상태의 작업환경에서 적용될 초정밀 위치결정기구의 개발에 목적을 두어, 자기력 발생원리를 에너지밀도가 높고, 열 문제부터 자유로운 VR 원리를 채택하였다. VR 원리에 의한 흡인력을 이용한 시스템에서의 구동력은 최종적으로 얻고자 하는 목표에 따라 다양한 형태로 설계가 가능하다. 한 쌍의 자기요소(수동/능동)를 통해서 얻을 수 있는 자기력의 종류는 두 가지로 나눌 수 있다. 첫번째는 단 방향의 1 자유도 힘이며, 나머지는 수평력과 수직력이 결합된 다자유도 힘이다. 전자는 자기부상열차, 자기베어링등에서 순수한 부상만을 위한 경우에 적용이 되며, 후자는 부상력과 추진력이나 추진력과 지지력(guiding force) 등이 동시에 필요로 하는 경우에 적용된다. 본 연구에서는 위의 목적에 따라서 세가지 모델을 선정하였다. Fig. 1은 앞서 설명한 힘을 발생시킬 수 있는 가장 기본적인 모델로서 이들의 조합에 의해서 목표로 하는 구동기의 설계가 가능하다. 이들 모델에 대해서 연구를 진행하였다. Fig. 1(a)의 모델 I은 x, y, z 축 방향으로의 자기력 발생이 가능하고, 모델 II는 부상력과 동시에 x 축으로의 추진력이 가능하며, 모델 III는 z 축으로의 부상력만이 작용하는 모델이다.

3. 전자석 모델링

3.1 자기회로

자기현상은 분산매개변수(distributed parameter) 현상으로 공간상에 고르게 분포하는 것이다. 그래서 자기현상을 해석하기 위해서는 많은 연산시간이 소요되는 벡터연산을 수행하여야 한다. 그러나, 적절한 가정하에서 전기회로 시스템과 같이 이산 매개변수(lumped parameter)계로 등가화하여 해석할 수 있다. 자기회로 해석법은 전자기계의 설계에 있어서 자기요소의 크기를 결정하거나, 인덕턴스, 전자기력등을 계산하기 위해서 유용하게 적용된다. 전자기시스템의 설계에서는 유한요소해석법(FEM)을 이용하는 방법도 있으나, FEM에 의한 경우에는 설계변경으로 인한 시스템 재설계시 많은 시간이 소요되기 때문에 자기회로를 이용한 전자기시스템의 해석과 설계가 큰 장점을 지닌다.^{5,6}

3.2 자기요소

자기회로 이론을 설명하기 앞서 자기요소에 대한 정의를 내린다. Table 1에서는 자기요소와 이와 대우관계를 가지는 전기요소를 나타낸다. 자기요소로는 코일에 인가된 전류나 영구자석등의 자기재료에 의해서 발생하는 자기포텐셜로 기자력(magnetomotive force)과 자성체 내부를 이동을 하는 자속(magnetic flux)이 있으며, 자기 임피던스에 해당하는 릴럭턴스(reluctance)와 릴럭턴스의 역수인 퍼미언스(permeance)로 분류할 수 있다.

3.3 동자기회로

자기회로를 이용하여 2 장에서의 전자석을 동자기회로로 나타낼 수 있다. 그러나, 자기회로에서는 전기회로와 달리 누설자속(leakage flux)과 극의 끝단에서 프린징(fringing)효과가 나타나기 때문에 전기회로보다는 정확도가 떨어진다. 누설자속

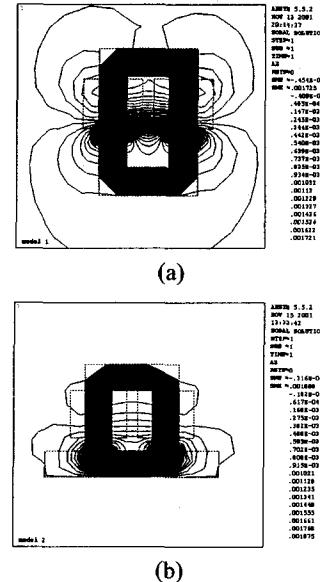


Fig. 2 Flux path in electromagnets using FEM

과 프린징효과는 피할 수 없는 자기효과이므로 보다 정확한 해석결과를 얻기 위해서는 여기에 대한 고려가 있어야 한다. Fig. 2는 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 5.5에 의해서 얻어진 전자석에서의 자속 경로를 나타낸다. 철심솔레노이드에서의 누

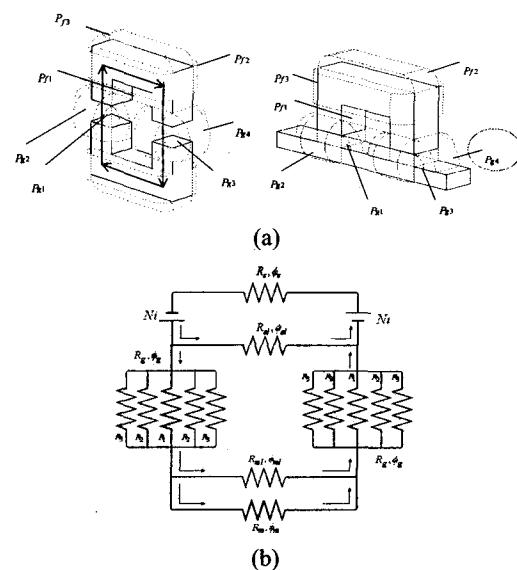


Fig. 3 (a) Approximate flux patterns (b) Equivalent magnetic circuit

Table 1 Analogy between magnetic and electric element

Magnetic element	Electric element		
MMF	$\mathfrak{F} = \int H \cdot dI$	Voltage	V
Magnetic Flux	$\phi = \int B \cdot dS$	Current	I
Reluctance	$\mathfrak{R} = \mathfrak{F} / \phi$	Resistance	R
Permeance	$\phi_p = 1 / \mathfrak{R}$		

설자속과 철심솔레노이드와 철심사이에서의 공극에서 반구모양의 프린징효과를 확인할 수 있다. Fig. 3(a)는 누설자속과 프린징효과를 고려하여 자속경로를 기하학적으로 구한 결과이다. 실제 자기회로를 구성할 때는 유한요소해석 결과를 직접 이용하기보다 Fig. 3(a)와 같은 근사적 자속경로를 이용하여 수식화한다. Fig. 3(b)는 Fig. 3(a)를 이용하여 구한 등가자기회로이다. 두 가지 전자석에 대해서 똑 같은 회로로 나타나지만, 공극에서의 퍼미언스는 각각 다른 값을 가진다. 모델 III은 Fig. 3(b)의 회로가 확장된 형태로 나타난다.

식(1)의 적분형태의 양페르법칙은 물질 내에서의 자기장의 관계를 나타내는데, 여기서부터 자기회로식을 유도할 수 있다.⁷

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_f \quad (1)$$

식(1)의 좌변은 자기요소의 정의에 따라서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} &= H_m l_m + H_g l_g \\ &= \phi(\mathfrak{R}_m + \mathfrak{R}_g) = \mathfrak{J}_m + \mathfrak{J}_g \end{aligned} \quad (2)$$

그리고, 식(1)의 우변은 회로를 통과하는 자유전류의 총합을 나타내며 다음과 같이 정리된다.

$$I_f = \sum_{n=1}^2 N_n i_n \quad (3)$$

여기서, N_n, i_n 는 각각 코일의 감은 수와 입력전류를 의미하며, 식(2)와 (3)을 식(1)에 대입하여 최종적으로 전기회로에서의 키르히호프의 폐회로법칙에서와 동등한 회로식을 얻을 수 있다.

$$\mathfrak{J}_m + \mathfrak{J}_g - \sum_{n=1}^2 N_n i_n = 0 \quad (4)$$

3.4 퍼미언스 모델

앞 절에서 구한 식(4)를 이용하여 관심점에서의 자속을 구할 수 있다. 그러나, 더욱 정밀한 결과를 얻기 위해서는 공극에서의 누설자속과 프린징효과에 관한 영향을 고려하여야 한다. 본 절에

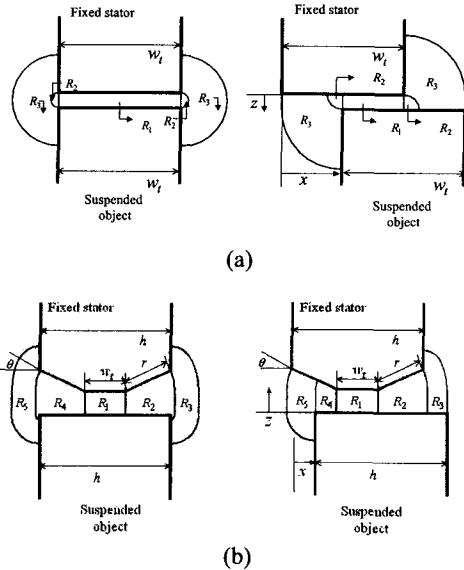


Fig. 4 Flux pattern model (a) Rectangle poles (b) Wedge and rectangle poles

서는 공극에서의 퍼미언스 또는 릴럭턴스 모델을 이용하여 프린징효과를 모델링한다. 앞서 설명한 유한요소해석에 의해서 자속 패턴을 구할 수 있지만 수식 유도를 위하여 Fig. 4 와 같이 기하학적인 자속패턴을 모델링하였다. Fig. 4(a)는 사각단면극 간의 자속패턴이며, Fig. 4(b)는 쇄기형과 사각단면극 사이에서의 자속패턴을 나타낸다. 공극에서의 자속은 Fig. 3(b)에서처럼 퍼미언스나 릴럭턴스의 직렬 또는 병렬결합을 통해서 구할 수 있다. 우선, Fig. 4(a)에서의 릴럭턴스는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathfrak{R}_1 = \frac{z}{\mu_0 (w_t - x) l_t} \quad (5)$$

$$\mathfrak{R}_2 = \frac{1}{0.54 \mu_0 l_t} \quad (6)$$

$$\mathfrak{R}_3 = \frac{\pi}{2 \mu_0 l_t \log(1 + \frac{2x}{z})} \quad (7)$$

여기서, w_t 와 l_t 는 각각 극의 폭과 길이를 의미하고, 공극에서의 릴럭턴스는 아래와 같이 된다.

$$\mathfrak{R}_g = \frac{\mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_2 \mathfrak{R}_3}{\mathfrak{R}_2 \mathfrak{R}_3 + 2\mathfrak{R}_3 \mathfrak{R}_1 + 2\mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_2} \quad (8)$$

Fig. 4(b)에 관한 릴럭턴스는 부록에서 다루며, 공극에서의 릴럭턴스는 다음과 같이 된다.

$$\mathfrak{R}_g = \left(\frac{\mathfrak{R}_2 \mathfrak{R}_3 \mathfrak{R}_4 \mathfrak{R}_5 + \mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_3 \mathfrak{R}_4 \mathfrak{R}_5 + \mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_2 \mathfrak{R}_4 \mathfrak{R}_5}{\mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_2 \mathfrak{R}_3 \mathfrak{R}_4 \mathfrak{R}_5} \right)^{-1} + \frac{\mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_2 \mathfrak{R}_3 \mathfrak{R}_5 + \mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_2 \mathfrak{R}_3 \mathfrak{R}_4}{\mathfrak{R}_1 \mathfrak{R}_2 \mathfrak{R}_3 \mathfrak{R}_4 \mathfrak{R}_5} \quad (9)$$

철심에서의 릴럭턴스는 아래와 같이 구해진다.

$$\mathfrak{R}_m = \frac{l_m}{\mu_r w_t l_t} \quad (10)$$

여기서, l_m 은 철심내에서 자속이 통과하는 경로의 총길이를 의미한다. 식 (5)-(6), (10)을 보면, 릴럭턴스는 자속 경로의 길이와 자속이 흐르는 단면의 크기와 관련됨을 알 수 있다. 식(10)에서 철의 비상대투자율(μ_r)은 아주 크기 때문에 철심에서의 릴럭턴스는 무시할 수 있다. 그래서 식(4)는 공극에서의 기자력과 입력전류만의 식으로 나타낼 수 있다. 그리고, 누설자속자체는 아주 미비한 영향을 미치므로 공극에서의 자속은 다음과 같이 된다.

$$\phi_g = \mathfrak{R}_g^{-1} \sum_{n=1}^2 N_n i_n = \wp_g \sum_{n=1}^2 N_n i_n \quad (11)$$

3.5 자기력

식(12)의 에너지 보존의 법칙에 따르면 자기력에 의한 일은 저장된 자기에너지의 변화로부터 기인함을 알 수가 있다. 그러므로, 저장된 자기에너지의 변화를 통하여 자기력을 구할 수 있다.

$$Fdx + vidt = dW_m \quad (12)$$

여기서, Fdx , $vidt$, dW_m 는 각각 기계적 일, 전기에너지, 저장된 자기에너지를 의미한다.

자기회로 내의 자기요소에서 자기 포화가 발생하지 않는다면 자기에너지는 아래와 같이 된다.

$$W_m = \frac{1}{2} L i^2 = \frac{1}{2} \lambda i \quad (13)$$

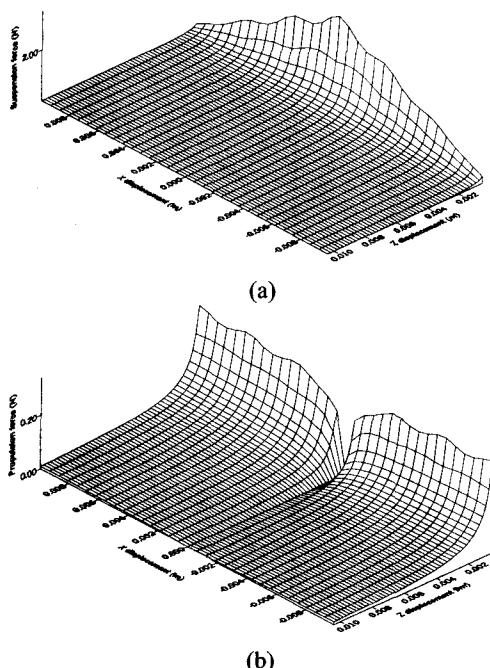
또한, 선형시스템에서는 자기에너지(energy)와

코에너지(coenergy)가 동일하기 때문에 코에너지에 가상일의 원리를 적용하여, 아래와 같이 자기력을 구할 수 있다.

$$\mathbf{F} = \frac{\partial W_m}{\partial \mathbf{p}} (i, \mathbf{p}) \quad (14)$$

자기에너지를 나타내는 식(13)에서 인덕턴스 L 은 $N^2 \mathfrak{R}_g^{-1}$ 로 정리가 되므로, 자기력은 공극에서의 페미언스와 관계가 있음을 알 수 있다. 2 장에서 제시한 세 개의 모델을 보면 철심의 z 축 변위에 대하여 페미언스가 동일하게 변하나, Fig. 1(b)와 Fig. 1(c)는 x 또는 y 축 변위에 대해서 페미언스가 일정하므로, 수평력은 작용하지 않는다.

Fig. 5는 모델링된 식을 바탕으로 구한 결과로서 Fig. 5(a)와 (b)는 Fig. 4(a)에 대한 수직력과 수평력을 나타내며, Fig. 5(c)와 (d)는 Fig. 4(b)에 대한 수직력과 수평력을 나타낸다. 전자석 모델 I에 대해서는 x , y 축 방향으로의 수평력이 동일하게 나타난다. Fig. 5를 보면 수직력과 수평력이 모두 공극의 크기에 지배적으로 영향을 받는데, 특히 자기 부상 시스템에서는 안정된 공극의 제어가 필요하다. Fig. 5(c)와 (d)에서의 수직력 대비 수평력이 Fig. 5(a)와 (b)의 값보다 증가하였는데, 이 결



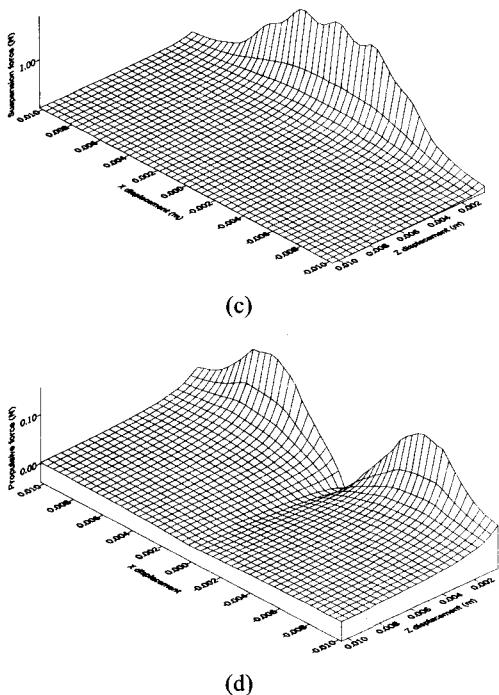


Fig. 5 (a) normal force (b) horizontal force for rec-rec poles (c) normal force (d) horizontal force for wedge-rec poles

과를 통해서 극의 단면이 쇄기형과 사각형의 조합인 경우에 동일한 부상력에 대해 높은 추진력을 얻기 때문에 부상과 추진력을 동시에 얻고자 하는 시스템에 유리함을 알 수 있다. 다음 장의 실험 결과에서도 동일한 결과를 얻는다. 이와 같이 자기력은 극의 단면형상과도 연관이 있으므로 궁극적으로 얻고자 하는 구동력에 맞춰 전자석을 설계할 수 있다.

4. 실험에 의한 검증 및 해석

앞 장에서 유도된 각 모델에 대한 식을 검증하기 위하여 자기력 측정실험을 수행하였다. 실험은 일정한 전류에 대하여 마이크로 스테이지(micro stage)를 이용하여 공극을 변화시키면서 위치별 수평/수직력을 힘/토크 센서로 측정하였다. 사용된 힘/토크 센서는 ATI 사의 FT3940으로서 6 자유도의 힘과 토크 측정이 가능하며, 최대 65N의 힘과 5Nm의 토크를 0.05N, 0.003Nm의 정밀도로

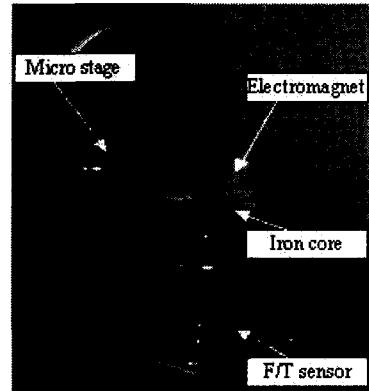


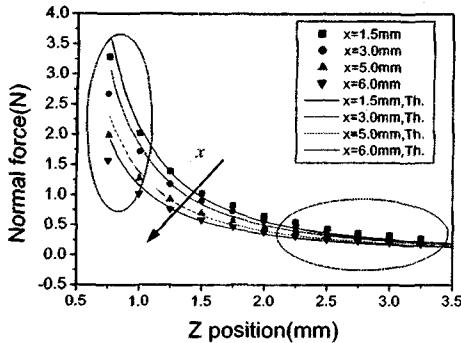
Fig. 6 Experimental setup

측정이 가능하다. 또한 센서 자체의 강성이 크기 때문에 힘에 의한 변위는 발생하지 않으며, 실험장치 설계시 자기력에 의한 변위에 따른 영향을 없애기 위해서 높은 강성을 가지고도록 설계하였다. Fig. 6은 실험 장치의 구성을 나타내며, Table 2는 실험에 사용된 전자석의 사양을 나타내는데, Fig. 4에서 내린 정의에 준한다. 쇄기형의 경우, 끝 단의 폭은 4mm로 하였으며, 깎임각은 15°로 가공하였다. 철심의 재료는 SS-41로서 탄소함유량이 0.23% 이하이다. 탄소의 함량이 적을수록 자기적 성질이 좋지만, 기계적 성질이 떨어지기 때문에 재료를 선택함에 있어 어느 정도의 절충점을 찾아야 한다. 한편, 규소강판을 적용하여 사용하는 경우는 유도전류의 발생을 낮추어 빠른 응답을 얻을 수 있는 장점이 있다.⁸ 코일의 보빈은 시중에서 쉽게 구할 수 있는 규격품을 사용하였다.

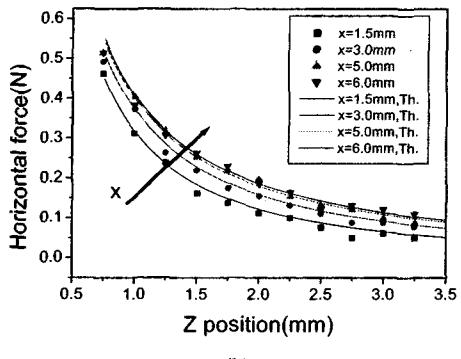
Fig. 7은 사각 단면의 극에 대해서 공극의 크기에 따른 수직력과 수평력의 이론치와 실험치를 나타낸다. 이론치와 실험치는 거의 일치한다. 그러나 Fig. 7(a)의 수직력에서 공극의 크기가 작아질

Table 2 Specification of electromagnets

Experimental condition	
Coil turns	335 turns
Pole width	10mm
Pole length	10mm
Core material	SS-41
Wedge angle (θ)	15°
Wedge end width	4mm



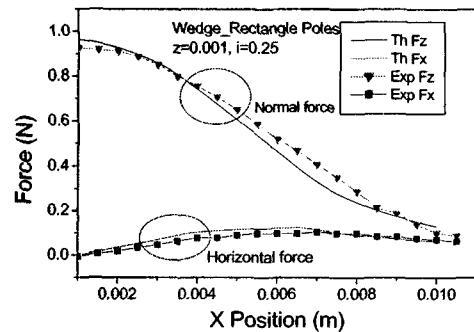
(a)



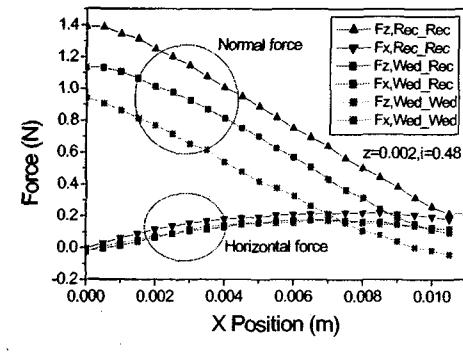
(b)

Fig. 7 Experimental results (a) Normal force (b) Horizontal force

수록 오차가 증가하고, 공극이 너무 큰 경우에는 부상력이 작아지기 때문에 충분한 힘을 얻기 위해서는 높은 전류가 필요하다. 이러한 경우 자기포화현상이나 열 문제가 발생하기 때문에 자기부상시스템의 설계할 때 원으로 표시된 영역은 피하여 공칭위치를 설정하여야 한다. Fig. 7(b)의 수평력에서는 x 축 방향으로의 변위가 증가하면서 수평력의 크기가 일정하게 된다. 이 사실을 바탕으로 부상과 추진을 동시에 필요로 하는 시스템을 설계할 때, 적절한 극의 배치를 통해서 이동자의 수평거리에 상관없이 일정한 수평력을 얻을 수 있다. Fig. 8(a)는 쇄기형과 사각 단면의 극에서의 이론치와 실험치를 나타내는데, 두 결과가 비교적 잘 일치한다. Fig. 8(b)는 여러 형상의 극의 조합에 대한 수직력과 수평력의 실험결과로서 사각 단면만으로 이루어진 경우는 수직력에 대한 수평력의 비가 0.268 이었으나, 쇄기형만으로 이루어진 경우는



(a)



(b)

Fig. 8 (a) Comparison theoretical results with experimental results (b) Experimental results for various combination

0.465로서 약 73%의 증가가 있었다. 즉 높은 추진력을 얻기 위한 방법으로는 쇄기형태의 극이 유리함을 다시 확인할 수 있다. 반면, 자기베어링과 같이 높은 수직력이 요구되는 경우는 사각형태가 유리함을 알 수 있다.

Fig. 9는 전자석 모델 II에서의 y 축 변위에 대한 수직력의 측정결과를 나타낸다. 앞서, 모델 II에서는 공극에서의 릴릭턴스가 y 축 변위에 독립적이므로 수직력의 변화가 거의 없다. 반면 x 축 방향으로의 변화에 대해서는 Fig. 7과 동일한 결과를 보였다. 모델 III의 경우에는 수직력은 Fig. 9와 같이 x , y 축 변위에 독립적으로 일정한 값으로 나타남과 동시에 수평력은 발생하지 않았다. 실험치들은 이론식의 검증을 위한 값들로서 실제 시스템 구축시에는 더욱 높은 값을 가지게 된다.

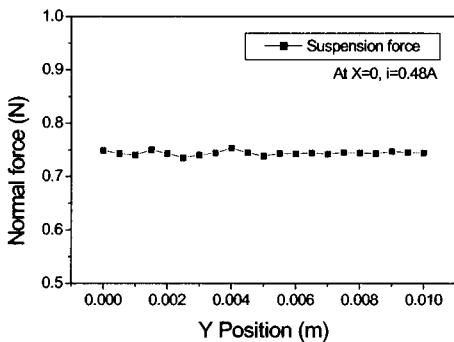


Fig. 9 Normal force of model II with respect to horizontal position.

5. 결론

본 연구에서는 초정밀 위치결정과 관련 깊은 다자유도 서스펜션 시스템과 자기베어링, 자기부상 구동기등의 개발에 응용분야를 두고, 전자석의 모델링과 해석을 수행하였다. 궁극적으로 얻고자 하는 구동력에 맞추어서 3 가지 모델의 전자석을 제안하였으며, 각 모델에 대하여 자기회로이론에 기초한 전자기학적 접근법을 이용하여 모델링을 수행함과 동시에 방법론을 제시하였다. 그리고, 실험을 통하여 모델링을 실효성을 검증하였으며, 각 전자석의 모델의 특성을 해석하였다. 본 연구에서 제시된 기본 전자석모델을 이용하여 앞서 서술한 자기 서스펜션 시스템과 자기베어링분야뿐만 아니라 다양한 분야에서의 구동기 개발의 기초자료가 될 수 있다.

후기

본 연구는 2002년도 한국과학재단 목적 기초 연구과제(R01-2000-00304)의 연구비 지원에 의한 연구 결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Jung Kwang Suk and Baek Yoon Su, "Precision Stage Using a Novel Contact-Free Planar Actuator Based on Combination of Electromagnetic Forces," Trans. of KSME A, Vol. 25, No. 11, pp. 1863~1872, 2001.
2. Jung Kwang Suk, Lee Sang Heon and Baek Yoon Su, "Feasibility Study of General-purpose Precision Stage Using A Novel Contac-Free Surface Actuator Based on Magnetic Suspension Technology," Trans. of KSME A, Vol. 26, No. 3, pp. 452~460, 2002.
3. Kim, Won-Jong, Trumper, David L. and Jeffrey, H. L., "Modeling and Vector Control of Planar Magnetic Levitator," IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 34, No. 6, pp. 1254~1262, 1998.
4. Jayawant, B. V., Electromagnetic Levitation and Suspension Techniques, Edward Arnold, pp. 1~19, 1980.
5. Nasar, S. A. and Unnewehr, L. E., Electromechanics and Electric Machines, John Wiley & Sons, Inc., pp. 121~123, 1983.
6. Roters, Herbert C., Electromagnetic devices, John Wiley & Sons, Inc., pp. 84~150, 1951.
7. Griffiths David J., Introduction to electrodynamics, Gyo hak sa, pp. 227~250, 1989.
8. Sakae Yamamura and Hitoshi Yamaguchi, "Electromagnetic Levitation System by Means of Salient-Pole Type Magnets Coupled with Laminated Slotless Rails," IEEE Trans. On Vehicular Technology, Vol. 39, No. 1, pp. 83~87, February 1990.

부록

3.4 절에서의 Fig. 4(b)의 쇄기형과 사각단면의 극 사이에서의 릴럭턴스는 철심의 x 변위에 따라서 다음과 같이 유도가 가능하다.

Case I ($0 \leq x < r \cos\theta$)

$$\mathfrak{R}_1 = \frac{z}{\mu_0 l w_t} \quad (a.1.1)$$

$$\mathfrak{R}_2 = \frac{\theta}{\mu_0 l} \log \left(\frac{z + r\theta}{z} \right)^{-1} \quad (a.1.2)$$

$$\mathfrak{R}_3 = \frac{\pi}{2\mu_0 l} \log \left(\frac{z + (r \cos\theta + x)\theta + (r \cos\theta + x - r)(\pi/2 - \theta)}{z + r\theta} \right)^{-1} \quad (a.1.3)$$

$$\mathfrak{R}_4 = \frac{\theta}{\mu_0 l} \log \left(\frac{z + (r \cos\theta - x)\theta}{z} \right)^{-1} \quad (a.1.4)$$

$$\Re_5 = \frac{(\pi/2 + \theta)}{\mu_0 l} \log \left(\frac{r\theta + z + (r - r \cos \theta + x)(\pi/2)}{z + (r \cos \theta - x)\theta} \right)^{-1} \quad (\text{a.1.5})$$

Case II ($r \cos \theta \leq x < w_t$)

$$\Re_1 = \frac{z}{\mu_0 l (w_t - x + r \cos \theta)} \quad (\text{a.2.1})$$

$$\Re_2 = \frac{\theta}{\mu_0 l} \log \left(\frac{z + r\theta}{z} \right)^{-1} \quad (\text{a.2.2})$$

$$\Re_3 = \frac{\pi}{2\mu_0 l} \log \left(\frac{z + r\theta + (\pi/2)(l - r - w_t + x - r \cos \theta)}{z + r\theta} \right)^{-1} \quad (\text{a.2.3})$$

$$\Re_4 = \frac{\pi}{2\mu_0 l} \log \left(\frac{z + \pi/2(x - r \cos \theta)}{z} \right)^{-1} \quad (\text{a.2.4})$$

$$\Re_5 = \frac{(\pi/2 + \theta)}{\mu_0 l} \log \left(\frac{r\theta + z + (x - r \cos \theta + r)\pi/2}{z + \pi/2(x - r \cos \theta)} \right)^{-1} \quad (\text{a.2.5})$$

Case III ($w_t \leq x < w_t + r \cos \theta$)

$$\Re_1 = \frac{(\theta + \pi/2)}{\mu_0 l} \log \left(\frac{z + (\theta + \pi/2)}{z + \theta(x - w_t - r \cos \theta)} \right)^{-1} \quad (\text{a.3.1})$$

$$\Re_2 = \frac{\theta}{\mu_0 l} \log \left(\frac{r\theta + z}{z + (x - w_t - r \cos \theta)} \right)^{-1} \quad (\text{a.3.2})$$

$$\Re_3 = \frac{\pi}{2\mu_0 l} \log \left(\frac{z + r\theta + (\pi/2)(h - r + x - w_t - r \cos \theta)}{z + r\theta} \right)^{-1} \quad (\text{a.3.3})$$

$$\Re_4 = \frac{\pi}{2\mu_0 l} \log \left(\frac{z + (x - r \cos \theta)\pi/2}{z + (x - w_t - r \cos \theta)\pi/2} \right)^{-1} \quad (\text{a.3.4})$$

$$\Re_5 = \frac{(\theta + \pi/2)}{\mu_0 l} \log \left(\frac{z + r\theta + (r + x - r \cos \theta)\pi/2}{z + (x - r \cos \theta)\pi/2} \right)^{-1} \quad (\text{a.3.5})$$